

고강도 나노벌크소재 개발동향



임 차 용

(KIMM 재료연구부)

'82 - '86 연세대학교 금속공학과(학사)
'86 - '88 한국과학기술원 재료공학과(석사)
'88 - '91 한국과학기술원 재료공학과(박사)
'91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



김 형 욱

(KIMM 재료연구부)

'87 - '91 한양대학교 재료공학과(학사)
'91 - '93 한양대학교 재료공학과(석사)
'93 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



강 석 봉

(KIMM 재료연구부)

'68 - '71 서울대학교 금속공학과(학사)
'74 - '79 동국제강, 삼미종합특수강, 한국중공업 근무
'79 - '81 한국과학기술원 재료공학과(석사)
'82 - '86 한국과학기술원 재료공학과(박사)
'80 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

나노미터(nm, 10^{-9} m) 크기의 영역, 즉 원자, 분자 또는 거대분자구조의 수준에서 소재, 장치, 시스템을 제작하고 활용하는 기술로 정의되는 나노기술(NT)은 정보(IT), 바이오(BT), 환경(ET) 및 우주기술(ST)과 함께 차세대를 선도할 첨단기술로 국가적으로도 주요 과학 정책으로 추진되고 있다. 거의 모든 과학영역에서 혁명적이라 할 만큼 빠른 속도로 전개되고 있는 나노기술은 21세기 가장 중요한 기술 중의 하나로 부각되고 있으며, 성공할 경우 엄청난 사회·경제적 파급효과와 부가가치가 기대된다. 나노기술의 분야에는 나노소자, 나노소재, 나노 바이오 및 환경, 나노측정 등 거의 모든 분야가 관련되어 있다. 나노재료는 제조방법과 내부구조에 따라 여러가지로 분류가 가능하며, 표 1은 제조방법에 따라 분류한 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 나노재료는 고체상태, 액체상태, 기체상태에서 여러 가지 방법으로 제조가 가능하며, 대부분 나노분말재료이다. 나노벌크소재는 액상의 급속응고기술과 고체상태의 강소성 가공 및 석출경화열처리 공정으로 제조되고 있다^[1]. 여기서는 표 1의 분류에서 나노분말재료(nano-powder materials)와 나노박막재료(nano-film materials)를 제외한 급냉응고에 의한 리본소재, 강가공에 의한 나노결정립소재 그리고 열처리기술에 의한 나노석출물 등을 나노벌크소재에 포함시켜 설명하고자 한다.

표 1. 나노재료의 제조공정

Processing route	Processing methods	Nanocrystalline materials (type)
Solid-state	Mechanical milling	powder
	Severe plastic deformation	grain
	Precipitation heat treatment	granular
Liquid-state	Sol-gel	powder/film
	Sonochemistry	powder
	Hydrothermal	powder
	Electrodeposition	powder/film
	Gas atomization	powder
	Laser beam melting	powder
	Melt spinning	continuous ribbon
Vapor-state	Chemical vapor deposition	powder/film
	Physical vapor deposition	powder/film
	Aerosol processes	powder/film
	Flame-assisted deposition	powder

나노벌크재료는 최소한 한방향 이상에서 100nm 이하의 결정체로 구성된 재료로, 많은 원자들이 결정립계에 존재하게 되어 기존의 소재에 비해 월등한 특성을 나타낸다. 이러한 특성에는 초소성, 고강도(높은 경도값), 높은 전기비저항, 낮은 열전도도, 우수한 전자기적 특성 등이 있다. 또한 나노벌크재료는 내부구조에 따라 크게 4가지로 구분 할 수 있다. (1) 나노입자 복합재료 : 나노미터 크기의 제2상입자(강화상, 석출상, 분산상)가 기지조직에 분산되어 소재의 기계적 및 기능적 특성이 비약적으로 향상되는 재료로 기지조직이 결정질인 경우이고, (2) 나노입자/비정질 재료 : 나노미터 크기의 제2상이 비정질 기지조직에 존재하는 경우이고, (3) 나노두께 다층상재료 : 소재의 내부구조가 나노미터 두께의 층으로 이루어진 다층벌크복합재료, (4) 단상 나노벌크재료 : 소재의 내부가 단상으로 이루어져 있으며 결정립(또는 재결정립)이 나노미터크기로 제어되

特 輯

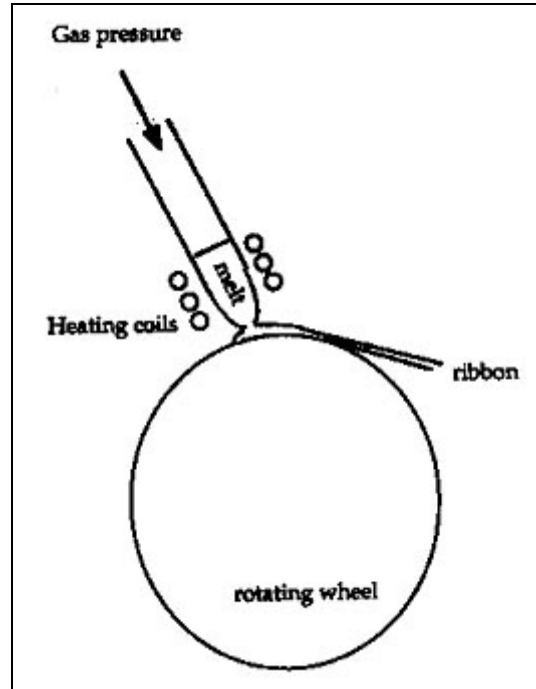


그림 1. Melt-spinning 장치의 개략도

어 다양한 특성을 갖는 재료 등이다. 본고에서는 이러한 나노벌크소재에 대하여 지금까지의 기술 동향 및 향후의 발전전망을 서술하고자 한다.

2. 나노결정체의 제조

2.1 급냉에 의한 나노입자의 생성

나노벌크소재는 많은 경우에 있어서 나노미터 크기(100nm이하)의 나노입자로 이루어져 있으며, 이러한 나노입자는 대부분 급속응고(RSP, rapid solidification processing)법으로 제조된다. 그리고 어떤 경우에는 정밀한 열처리 기술에 의해 급속응고된 비정질 재료를 나노크기로 결정화 시키기도 한다. 급속응고는 용탕을 얇은 층의 리본이나 작은 방울 형태로 냉각매체와 접촉하여 액상에서 열을 급속히 냉매로 전달하는 조작으로 melt spinning 등 많은 기술들이 보고되어 있다^[2-5]. 그림 1에 melt spinning법의

개략도를 나타내었다. 급속응고공정에서 용탕으로부터 열을 빠른 속도로 빼앗게 되면 열역학적인 평형에서 크게 벗어나게 되어 고용한계의 증가, 불순물 편석의 억제, 비평형상(준결정, 비정질 등)의 생성과 더불어 급격한 결정립의 감소(나노결정립)를 얻을 수 있다.

급속응고시 형성되는 결정립의 크기는 핵생성 속도(N)와 성장 속도(G)에 의해 결정된다^[6,7]. 이 두 인자는 응고전의 과냉도(ΔT)에 의존하는데 다음의 식으로 관계되어 있다.

$$N = nv \exp(-Q/RT) \exp(-16\pi \sigma^3 f(\theta) / (3\Delta G v^2 kT)) \approx nD/a^2 \exp(-B/(\Delta T)^2) \text{ ----- (1)}$$

$$G = av \exp(-Q/RT) (1 - \exp(\Delta G v/kT)) \approx (D/a)(1 - \exp(-A \Delta T)) \text{ ----- (2)}$$

여기서 $\Delta G = L\Delta T/T_m$

$f(\theta) = (1/4)(2-3\cos\theta + \cos^3\theta)$ 이고,

a : 원자간 거리

v : 원자 진동수

Q : 원자가 고체-액체 계면을 통과하는데 필요한 활성화에너지

$\Delta G v$: 응고의 구동력

T_m : 용해온도

D : 확산계수(액상에서)

θ : 고체핵의 기저와의 접촉각

n : 핵생성자리의 밀도

σ : 고체-액체의 계면에너지

A, B : 상수

급속응고(melt spin에 의한 리본의 주상정 응고)시 생성되는 결정립의 크기 d는 핵생성 속도(N)와 성장속도(G), 그리고 과냉도(ΔT)와 다음과 같은 관계가 있다^[6].

$$d^3 = (8G/\pi N) \text{ ----- (3)}$$

$$d^3 = 8a(1 - \exp(-A\Delta T))/(\pi n \exp(-B/\Delta T^2)) \text{ -- (4)}$$

식(3), (4)로부터 미세한(나노크기) 결정립은 핵생성속도가 아주 크고 성장이 느릴때 얻어지며, 이는 과냉도가 큰 경우이다.

2.2 강소성 가공

결정립 미세화는 금속재료의 강도 및 인성 등 기계적 특성을 향상시키는데 매우 유효하게 적용되는 방법 중 하나이다. 그러나 결정립 미세화를 위해서 기존의 소성가공법을 적용할 경우 가공량 증가에 따라 재료의 단면적 감소가 불가피하므로 소재 내에 원하는 만큼의 변형에너지를 축적시키는 데에는 제한이 따를 수 밖에 없다. 따라서 기존의 소성가공으로는 금속재료의 결정립 크기를 100nm이하의 수준까지 미세화시킬 수가 없다. 그림 2에는 금속재료의 가공법에 따라 얻을 수 있는 결정립의 크기와 이에 따른 특성변화의 개념도를 나타내었다. 기존의 가공법인 압연, 압출, 단조 및 열처리에 의해서는 결정립의 크기가 micron order이며, 최근에 많이 연구되고 있는 강소성가공(SPD, Severe Plastic Deformation)기술에 의해서는 submicron의 결정립을 얻을 수 있다. 강소성 가공의 주요 개발기술로서는 ECAP(Equal Channel Angular Pressing)법^[8-11], ARB(Accumulative Roll Bonding)법^[12,13] 및 극저온 가공법이 있으며, 소재를 극한까지 가공하여 결정립을 미세화 하는 것으로, 고 변형에너지 축적상태의 재료에 적절한 열간, 온간 가공 및 열처리를 통하여 미세한 submicron의 재결정립을 형성시킬 수가 있다. 이러한 강소성 가공법도 100nm이하의 결정립을 얻기는 상당히 어려우며, 나노구조의 재료를 제조하기 위해서는 나노분말법 이외에 급속응고기술이나 HPT(High Pressure Torsion)법^[14], Repeated pressing and rolling^[15] 및 특수한 가공열처리 기술^[16]이 필요하다.

ECAP은 Valiev에 의해 새롭게 개발되어 미세한 결정립 크기를 갖는 소재를 얻을 수 있는

Materials type	Conventional Structural materials	Ultra fine grain materials	Nano Structured Materials
Manufacturing process	- Rolling - Extrusion - Forging - Annealing	- plasma spray synthesis - Equal channel angular pressing(ECAP) - Accumulative Roll Bonding(ARB) - Cryogenic Working process	- Electron beam evaporation (powder) - Vapor quenched method (powder) - Rapid solidification - SPD(HPT, Repeated rolling) - Special HT
Properties change		Mechanical properties	Electric & magnetic properties
Grain Size	1mm	10 μ m	1 μ m

그림 2. 제조공정에 따른 결정립 미세화와 특성변화(개념도)

가능성이 제시되었다. 동일한 단면적을 갖는 두 개의 채널을 가진 다이를 통해 소재를 pressing 하는 가공방법으로, 두 채널이 만나는 교차지점에서 채널 안쪽 각과 바깥쪽 곡률각을 이용해 소재에 매우 심한 전단변형을 가하는 간단한 가공방법이다. 그림 3은 장치의 개략도이다. 또한 ECAP법은 지속적인 반복 변형으로 가공량이 증가하더라도 소재의 단면적 감소를 수반하지 않으므로 재료 내에 높은 변형 에너지를 축적시킬 수 있어 결정립 미세화의 구동력을 제공할 수 있다. ECAP법은 철강재료나 비철재료, 금속간화합물 등 다양한 소재에 적용되어 submicron의 결정립을 얻고 있으며, 알루미늄과 같이 적층결합에너지가 큰 소재에서는 nano scale 결정립을 얻기위해 이 방법으로는 한계가 있는 것으로 알려져 있다.

ARB는 일본의 Saito 등이 고안한 방법으로 그림 4에 나타낸 바와 같이 재료의 연속제조가 가능하고 미세조직을 submicron까지 제조가 가능

하다. 이러한 제조공정은 반복적으로 가능하기

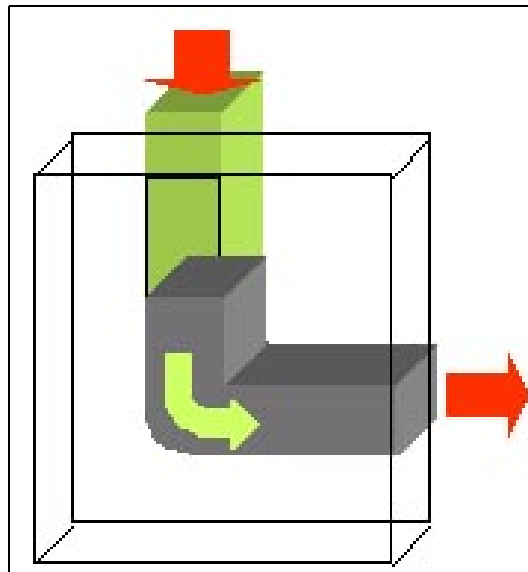


그림 3. ECAP 장치의 개략도

때문에 두께의 감소없이 큰 변형량을 부과함으로써 고변형에너지를 축적할 수 있고, 서로 반

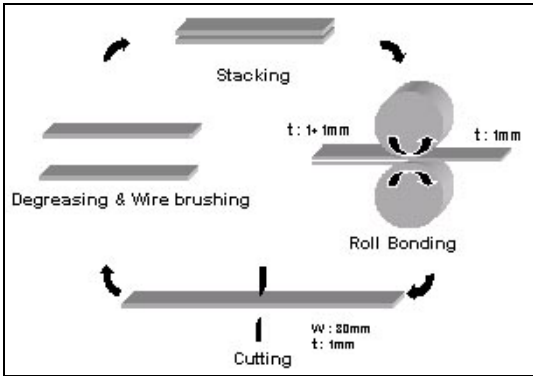


그림 4. ARB 장치의 개략도

응하지 않는 이종소재를 초기 재료로 선택함으로써 층의 두께를 더욱 줄일 수도 있다. 또한 초기부터 이종금속을 접합하여 가공할 수 있기 때문에 신기능을 발현하는 다층복합기능소재를 설계 및 개발하는데 유리한 가공법이다.

HPT법은 밀폐된 die내의 시편에 높은 압력(보통 수십GPa)을 가하면서 전단변형을 가하여 소재내부에 큰 변형에너지를 축적시키는 방법으로 nano scale의 bulk조직을 얻기는 쉬우나 높은 압력을 가해야 하기 때문에 소재의 크기 및 설비에 제약을 받는다. 그러나 알루미늄 합금과 같이 다른 금속에 비해 적층 결합 에너지가 높아서 냉간가공시 재료 내에 축적되는 변형에너지를 대부분이 열에너지로 방출되는 소재에서는 유용한 강가공방법이다. Repeated Pressing and Rolling(RPR) 기술은 ARB 공정을 변형시켜 서로 반응하지 않는 이종금속에 적용함으로써 고강도와 신기능을 발현하는 나노벌크복합기능소재를 설계 및 개발하는데 유리한 가공법이다. 즉 기존의 강가공법인 ECAP, ARB, 극저온가공 등으로는 얻을 수 없었던 영역인 층간격 100nm이하의 나노벌크다층복합재료를 제조할 수 있다. 이와 같이 HPT 및 RPR 강가공법은 기존의 강가공법으로 얻을 수 없었던 nanometer크기의 벌크 소재를 제조하는데 매우 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 열처리 기술

고용체의 고용한도가 온도가 내려갈수록 감소하는 시효처리형 합금에서 시효열처리에 의한 석출물의 크기는 초기 GP zone에서는 나노미터 크기(100nm이하)이나 안정된 석출상은 대부분 submicron에서 수 micron범위의 크기를 가진다. 그러나 최근에는 나노크기의 입자를 석출시키는 연구가 진행되고 있으며, 가공과 열처리를 병행하는 가공열처리 기술에 의해 석출물 크기를 나노미터로 제어한 강판이 개발되고 있다^[16]. 또한 공구강의 특성을 향상시키기 위해 나노입자를 석출시키려는 연구가 미국에서 처음 실시되어 극저온 처리후에 다시 템퍼링을 실시하면 길이가 나노미터 크기의 탄화물이 석출되어 내마모성이 향상되는 현상이 발견되었다. 이러한 기술은 일반 공구강, 금형강, 스테인레스강, 초경합금에 적용가능하다. 열처리에 의한 나노크기 입자의 석출 및 분산기술분야에서 주로 연구되고 있는 내용은 나노입자의 석출과 비평형 나노입자분산, 미세조직의 안정성 해석, 특성평가 등 새로운 현상을 파악하고 응용하는 단계에 있다. 나노 입자 석출제어 철강재료 개발분야의 경우 기존의 구조용 철강재료의 큰 수요처인 자동차 산업 및 모든 산업분야에 순차적으로 확대될 수 있는 무한한 잠재력을 지니고 있다. 따라서 개발에 따른 파급효과는 소재산업뿐만 아니라 관련산업 전반에 매우 클 것이며 개발 주체가 시장을 선점할 수 있을 것으로 예상된다.

3. 나노벌크재료의 종류 및 특성

3.1 나노입자 복합재료

나노입자 복합재료는 나노미터크기(100nm이하)의 제2상이 결정체의 기지내에 분산되어 있는 재료로 급속응고 및 가공열처리에 의해 주로 만들어 진다. 고상에서 상분리가 일어나는(서로

표 2. 급속응고(melt spinning)시 나노입자의 크기

합금계	휠의속도 (m/s)	입자크기(범위) (nm)	평균입자크기 (nm)
Zn-10wt.% Pb	30	8-200	8
Zn-2wt.% Bi	15	15-75	25
Zn-10wt.% Bi	15	8-160	10
Al-10 wt% Pb	30	20-200	30
Al-2wt.% Pb	30	4-15	5
Al-8wt.% In	15	20-160	80
Cu-10wt.% Pb	15	100-400	100

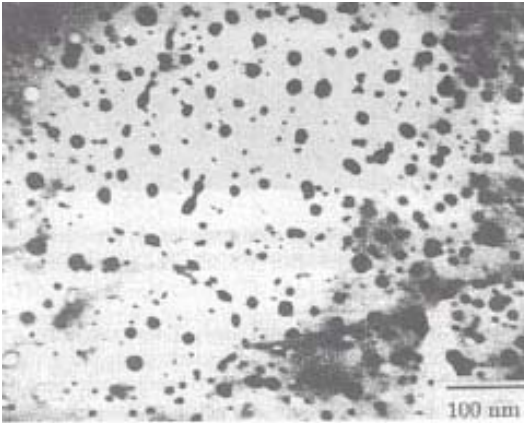


그림 5. 나노입자 복합재료의 투과전자현미경 사진 (Al-10wt.% Pb합금^[17])

고용도가 아주낮은 합금) 합금을 액상에서 급속 응고하게되면 용해온도가 낮은 원소의 액상이 과냉되고, 이 액상의 연속적 응고에 의해 나노입자가 생성되게 된다. 생성되는 나노입자(분산상)는 과냉된 액상에서 불균일핵생성에 의해 만들어지며, 기지와 일정한 방위관계를 갖는다. 대표적인 예로써 Al-10wt% Pb합금에서 급냉에 의해 α 기지내에 Pb입자가 10~50nm크기로 분포되어 있는 사진을 그림 5에 나타내었다^[17]. 나노입자 복합재료가 만들어지는 합금계로는 Al-Bi, Al-Pb, Cu-Pb, Zn-Pb, Zn-Bi^[18] 등이다. 표 2에는 나노입자를 형성시키는 합금조성과 melt spinning의 휠속도, 나노입자의 크기범위 및 평균크기를 나타내었다^[18].

다른 종류의 나노입자 복합재료로서 거대자기저항(giant magnetoresistance, GMR) 특성을 나타내는 재료로는 Cu-Co, Cu-Fe, Fe-Au, Co-Au

등의 합금계가 있다^[19-20]. GMR특성은 강자성체와 비자성체(혹은 상자성체)를 나노구조(나노입자, 나노층상)로 제어하면 자기스핀이 구속되고 인가되는 자장크기에 따라 전기저항값이 대단히 달라지는 현상으로 1989년 IBM에서 처음 발견되었으며 하드디스크 읽기 헤드에 사용되고 있다. 급속응고된 Cu₇₀-Co₃₀에서는 두종류의 Co-rich fcc입자가 생성되나 이것은 GMR특성에는 효과가 없고, 이 합금을 소둔열처리하면 5-7nm의 아주 미세한 디스크형상의 석출물이 형성되는데 이 입자로 GMR 특성이 나타난다.

나노입자 복합재료의 또다른 예로써 일본의 NKK사에서는 가공열처리에 의해 나노미터크기의 석출물을 함유한 고성형성 고장력 열연강판을 개발하였다^[16]. 석출경화법을 근간으로 하고 합금원소와 열간압연을 독특하게 결합하여 기존 석출물 크기의 1/50인 nanometer로 석출물의 크기를 제어한 것이다. 상업적으로 생산되는 열연강판에 새로운 석출 경화법을 접목시킴으로써 우수한 성형성과 780MPa의 강도를 가지는 열연강판이다. 가벼운 소재를 사용하는 서스펜션과 같은 자동차 바디에 사용되는 대다수의 고강도강은 590MPa의 강도를 가지는데, 자동차의 바디나 강도를 요구하는 부품에 기존의 고강도강인 780MPa급을 사용하는 것은 성형성에 문제가 있었기 때문이다. 새로 개발된 나노입자 고강도강은 기존의 강보다 높은 강도 및 성형성을 가지고 있어 자동차 경량화에 적용이 검토되고있다.

3.2 나노입자/비정질 재료

급속응고에 의한 고강도 경량의 나노입자/비정질 소재개발은 일본에서 많이 연구되었으며, 주로 알루미늄계 합금으로 Al 함량이 85-94 at.% 함유된 Al-TM-Ln (TM = Ni, Cu, Ag, Co, Fe, Zr, Ti 등이고, Ln = Ce, La, Y, Mm, Nd 등)계가 연구되었다^[21,22]. 급속응고시 응고속도를 제어하여 비정질의 기지에 10~30nm크기의

표 3. 알루미늄 나노입자/비정질 합금의 인장강도^[22]

Alloys	Structure	Preparation method	Tensile Strength (MPa)
Al ₈₈ Y ₂ Ni ₃ Mn ₂	Nano α -Al + Amorphous	Melt spinning	1470
Al ₈₈ Ce ₂ Ni ₃ Fe ₃	Nano α -Al + Amorphous	Melt spinning	1560
Al ₈₇ Ni ₇ Nd ₃ Cu ₃	Nano α -Al + Amorphous	Annealing of melt-spun ribbons	1460

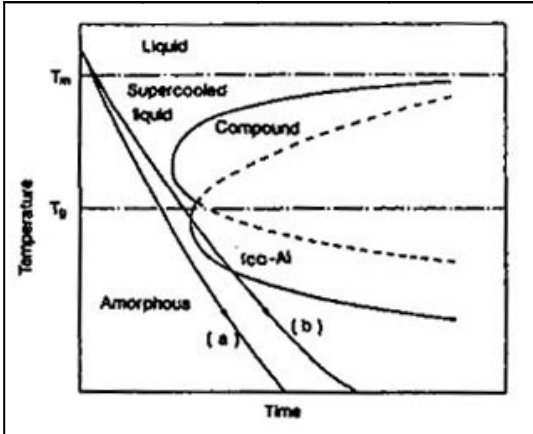


그림 6. 알루미늄 비정질 합금의 연속냉각변태곡선(개략도)

α 상을 바로 형성시키거나 비정질을 열처리에 의해 일부 결정화 시키는 방법으로 미세한 나노입자를 형성시켜 기존의 고강도 알루미늄 소재보다 인장강도가 높은 약 1200MPa이상의 소재를 제조할 수 있다. 이러한 나노입자 형성은 급냉시(또는 열처리시)의 연속냉각변태(CCT)곡선으로 설명될 수 있다. 그림 6에는 알루미늄계 합금의 급속응고시 연속냉각변태거동의 개략도를 나타내었다. 즉, 응고속도가 빠른경우(그림 6에서 (a)곡선), 결정체의 입자를 형성하지 못하고 전체가 비정질로 응고되며, 약간 느린 냉각속도((b)곡선)에서 fcc의 α 상을 형성하고 나머지는 비정질로 응고된다. 이러한 거동은 비정질의 열처리에서도 똑같이 적용될 수 있다. 형성되는 입자를 나노 scale로 만들기 위해서는 아주 큰 핵생성 속도와 느린 성장이 필수적이다. 핵생성 속도는 급속응고시에 형성되는 핵생성 자리에

의존하며 응고속도에 따라 달라지나 10²¹-10²³m⁻³ 정도이다. 이러한 나노입자/비정질 재료는 Mg합금계^[23], Ti합금계^[24], 및 Ni합금계에서도 연구되고 있다.

알루미늄계의 나노입자/비정질 재료는 α 상 나노입자의 분율이 증가할수록 강도, 탄성계수 및 경도값이 증가하는데^[22], 이는 나노입자의 특성에 기인한다. 표 3에는 대표적인 합금의 구조 및 인장강도를 나타내었다.

나노입자/비정질 재료의 또다른 연구분야는 자성재료이다. Fe계 합금의 급속응고 및 결정화 열처리에 의해 비정질에 α -Fe 나노입자를 형성시킨 연자성 재료가 개발된 바 있다^[25]. 이 재료는 Fe 함량이 70~85 at.%정도 함유된 합금으로 약 520°C온도에서 결정화 열처리에 의해 5~20nm 크기의 Fe입자를 비정질에 분산시킨 것이다. 대표적인 합금으로는 Fe_{73.5}Si_{13.5}B₃Nb₃Cu₁(품명 FINEMET)이다. 또한 Fe-Nd-B계 영구자석도 급속응고 및 열처리에 의해 나노크기의 입자를 분산시켜 개발되고 있다^[26].

3.3 나노두께 다층상재료

서로 반응하지 않는 합금계(Cu-Fe, Fe-Ag, Co-Cu, Ni-Ti 등)의 판재를 연속적으로 적층하여 고온압축-열처리-상온압연-절단-적층의 cycle공정을 반복적으로 수행함으로써 layer thickness를 제어하는 기술로 각각의 단계에서 온도 및 가공량을 제어하여 nano-layer thickness로 갈때까지 layer의 파손 및 반응을 방지하여 nano-scale의 다층상 재료를 개발할 수 있다. 이러한 제조공정은 submicron의 소재를 제조하는 강소성 가공(severe plastic deformation)과는 구분되는 개념으로 repeated pressing and rolling 기술이며, 나노다층벌크소재(nano-thickness multi-layer bulk materials)를 제조하는 핵심기술이라고 할 수 있다.

이러한 공정으로 제조된 나노다층벌크재료는 layer thickness가 20nm이하로 제어가 가능하며,

제반 기계적 특성(강도, 경도, 초소성)이 우수할 뿐만 아니라 전기비저항, 낮은 열전도도, 우수한 전자기적 특성(magneto-resistivity, thermoelectricity)으로 인하여 고강도의 구조재 뿐만 아니라 기능성 소재로도 응용이 가능하다. Cu-Fe, Co-Cu계 나노층상 복합재료는 고강도 뿐만 아니라 거대자기저항인 GMR 특성도 나타낸다^[15].

3.4 단상 나노벌크 재료

단상의 나노벌크 재료는 결정립의 크기가 100nm이하인 재료를 의미하며, 이러한 재료를 제조하는 것은 상당히 어려운 기술이다. 이러한 소재를 만드는 방법은 급냉에 의한 비정질 합금을 결정화시키는 방법과 강소성 가공에 의한 방법 등이 있다. 비정질의 결정화시에는 계면의 이동 제어가 중요하며, 이때 형성되는 결정립의 평균크기(d)는 결정화가 완전히 일어나는 시간(t_{cryst})과 관계가 있다.

$$d = c(t-t_{cryst})^{1/3} \text{ ----- (5)}$$

위 식에서 c는 상수로 온도, 입계의 이동도, 입계의 자유에너지 등에 의존한다. 즉 비정질의 결정화 후의 결정립의 크기는 결정화가 완전히 일어난 후의 시간의 증가에 따라 커짐을 알 수 있고, 온도, 시간 및 입계의 이동도를 제어함으로써 나노결정립의 단상재료를 얻을 수 있다.

강소성 가공에 의한 단상 나노벌크소재는 러시아의 Valiev 등에 의해 최근에 연구되고 있으며 HPT법에 의해 Cu합금에서 50nm급의 단상 나노소재를 제조하였다는 보고가 있다^[14]. 그러나 기존의 강소성 가공법인 ECAP, ARB 등의 방법으로는 알루미늄 등 적층결합에너지가 높은 합금에서 100nm이하의 결정립을 얻는 것은 가공중의 동적재결정에 의해 상당히 어려운 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

최근 많은 관심이 집중되고 있는 나노소재기술 중 고강도 나노벌크재료에 대하여 제조방법 및 종류를 살펴보았다. 나노벌크재료는 대부분 급속응고기술에 의해 제조되나 강소성 가공 및 특수한 가공열처리 기술로도 제조가 가능하며, 나노입자 복합재료, 나노입자/비정질 재료, 나노층상 복합재료, 단상 나노벌크재료 등 여러 종류의 나노벌크재료가 연구되고 있다. 나노벌크재료 개발기술은 소재의 조성변화 없이 구조의 나노화에 의해 고강도 뿐만 아니라 복합기능의 시너지화를 창출할 수 있기 때문에 앞으로 재료연구분야의 중요한 하나의 기술로서 여러 산업분야에 광범위하게 적용될 수 있으나, 아직까지는 활용보다는 나노구조화 제어기술 및 새로운 특성을 찾기위한 요소기술 연구단계라 할 수 있다.

최근 선진국을 중심으로 나노재료기술 개발에 대한 투자와 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이미 미국을 비롯한 유럽 및 일본에서는 정부차원의 연구지원 정책이 수립되어 연구가 시작되었다. 이들 국가가 나노재료기술을 비롯한 나노기술에 집중적인 투자를 하는 이유는 나노기술이 성공적으로 개발되면 경제·사회적으로 엄청난 파급효과가 기대되기 때문이다. 국내에서도 21세기 프론티어연구개발사업으로 “나노소재 기술개발”이 선정되어 올해부터 본격적인 연구가 시작될 전망이다. 나노소재기술, 특히 나노벌크소재 분야는 아직도 세계적으로 초기 연구단계에 있으므로 효율적인 투자와 연구가 이루어진다면 세계적으로도 이 분야를 선도할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] K. L. Choy, "Vapor Processing of Nanostructured Materials", Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology,

- edited by H. S. Nalwa, Academic Press(2000), 533
- [2] H. Jones, in "Rapid Solidification of Metals and Alloys", Monograph No. 8, Institute of Metallurgists, London, (1982)
- [3] B. Cantor, in "Science and Technology of the Undercooled Melt" edited by P.R. Sahn, et al., The Netherlands, (1986), 3
- [4] T.R. Anthony and H.E. Cline, J. Appl. Phys., 50, (1979), 245
- [5] I.T.H. Chang, B. Cantor, and A.G. Cullis, J. Non-Cryst. Solids, 117-118, (1990), 263
- [6] J. N. Martin, R.D. Doherty, and B. Cantor, in "Stability of Microstructure in Metallic Systems", Cambridge University Press, (1977), 84
- [7] A.L. Greer, Mater. Sci. Eng., A133, (1991), 16
- [8] R. Z. Valiev, Materials Science Forum Vols. 243-245, (1997), 207
- [9] R.Z. Valiev and R.K. Islamgaliev, Materials Science Forum Vols. 304-306, (1999), 39
- [10] M. Furukawa, P.B. Berbon, Z. Horita, M. Nemoto, N.K. Tsenev, R.Z. Valiev, and T.G. Langdon, Met. and Mater. Trans. A, Vol. 29A, (1998), 169
- [11] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, and T.G. Langdon, Acta Mater., Vol.46, (1998), 3317
- [12] Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji and T. Sakai, Acta Mater., Vol.2, (1999), 579
- [13] N. Tsuji, K. Shiotsuki, H. Utsunomiya, and Y. Saito, Materials Science Forum Vols. 204-306, (1999), 73
- [14] R. Z. Valiev, "Developing Severe Plastic Deformation for Enhancement of Properties in Metallic Materials", 2001-JIM Fall Meeting at Kyushu Industrial University(2001).
- [15] Y. Watanabe, K. N. Ishihara, and P.H. Shingu, Scripta Mater., Vol.44, (2001), 1853
- [16] Advanced Materials and Processes, 2001. 5
- [17] R. Goswami and K. Chattopadhyay, Mater. Sci. Eng., A226-228, (1997), 1012
- [18] R. Goswami and K. Chattopadhyay, Mater. Sci. Eng., A179-180, (1994), 198
- [19] N. Kataoka, H. 푸애, K. Fukamichi, and Y. Shimada, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.32, (1993), 1969
- [20] O. Drhohlav, W. J. Botta Filho, and A.R. Yavari, Materials Science Forum Vols. 225-227, (1996), 359
- [21] T. Matsumoto, Materials Science Forum Vols. 179-180, (1994), 9
- [22] A. Inoue, Y. Horio, Y.H. Kim, and T. Matsumoto, Mater. Trans., JIM, Vol.33, (1992), 669
- [23] S.G. Kim, A. Inoue, and T. Matsumoto, Mater. Trans., JIM, Vol.32, (1991), 875
- [24] C. Seeger and P.L. Ryder, Mater. Sci. Eng., A179-180, (1994), 641
- [25] Y. Toshizawa, S. Oguma, and K. Yamauchi, J. Appl. Phys., Vol.64, (1988), 6044
- [26] A. Inoue, A. Takeuchi, A. Makino, and T. Matsumoto, Mater. Trans., JIM, Vol.36, (1995), 689